



TITLE:

歴史的海面水温解析の改良 : COBE-SST2

AUTHOR(S):

平原, 翔二; 福田, 義和; 石井, 正好

CITATION:

平原, 翔二 ...[et al]. 歴史的海面水温解析の改良 : COBE-SST2. 週間及び1か月予報における顕著現象の予測可能性 2013: 60-68: 共同研究 (一般研究集会) 24K-08.

ISSUE DATE:

2013-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/173507>

RIGHT:

歴史的海面水温解析の改良 —COBE-SST2—

平原翔二・福田義和（気象庁地球環境・海洋部）

石井正好（気象研究所気候研究部）

1. はじめに

海面水温(以下、SST)は、気候を知るうえで基本的な物理量のひとつである。長期間のSST データを扱う上で問題となるのは、その観測手法や観測点分布が年代とともに大きく変わり、気候変化シグナルの抽出を難しくしていることにある。この点で、長期にわたって均質に客観解析された格子点データセットが有用であり、温暖化や気候変動の解析だけでなく、大気の長期再解析(Kalnay et al. 1996; Uppala et al. 2005; Onogi et al. 2007)の下部境界条件などにも活用されている。

Ishii et al. (2005)は、100 年以上にわたるSST、およびその他の海上気象要素を対象に客観解析を行った(以下、ISSM05)。解析値の品質を評価するなかで、当時デジタル化された神戸コレクション(Manabe 1999)が、19 世紀末から 20 世紀初頭の解析値の誤差の減少へ大きく寄与することが確かめられた。

ここでは、ISSM05 の改良版にあたるSST データセット(以下、ISSM05 のデータセットは COBE-SST、本研究のデータセットは COBE-SST2 として区別)の概要を記述する。また、これを用いて、歴史的 SST データセットが過去にどれくらい遡って信頼できるものなのか、評価した結果を報告する。

2. 用いた観測データ

現場観測には、ICOADS rel. 2.5 (Woodruff et al. 2011) を主に利用する。これに加えて、気象庁が現業的に取得・蓄積している GTS 通報値、および日本近海には水産庁の観測(Tomosada 1982)を併用する。

図 1 に示される観測数の変遷を見ると、利

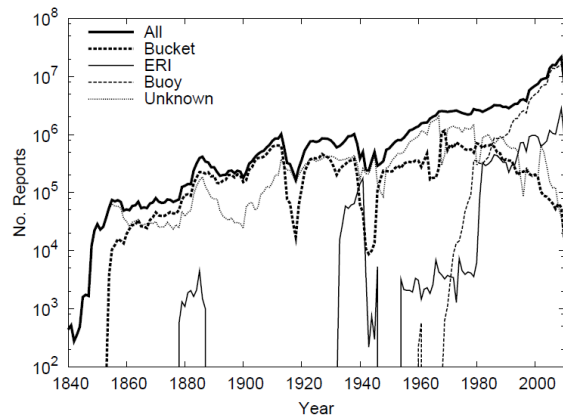


図 1 : SST 観測数の変遷

全観測（太実線）、バケツ（太点線）、エンジン室採水(ERI; 細実線)、ブイ（細点線）、不明（ドット）。横軸は年。縦軸は \log (月別観測数)。

用可能なデータは期間を通しておおむね単調増加しており、2000 年代に入ると、1860 年代とくらべて 100 倍のオーダーの観測が利用できるようになっている。個別の観測手法に着目すると、第 2 次世界大戦以前はバケツ採水観測（太破線）が主流であった。次第にエンジン室採水観測(細実線; 以下、ERI)への置き換えが進むが、大戦以降もしばらくはバケツ観測が続いていたことが分かっている (Kennedy et al. 2011)。ただし、この時代のメタデータの多くが不明(点線)となっている。1980 年代以降になると、全球に展開するブイロボット観測（細破線）が他を圧倒するようになる。

衛星観測には、AVHRR pathfinder ver.5 を利用する。これには、漂流ブイに対して $0.2 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 程度の低温バイアスが認められたので、Reynolds et al.(2002)に準じたバイアス補正を行う。後述のとおり、衛星観測は、

解析に必要な統計量の算出や誤差評価のみに利用し、最終解析ではこれを直接利用することはない。

現場観測の少ない極域では、海氷密度度の情報を SST の代替観測として利用する。海氷に覆われている格子ほど、格子平均した海面水温は結氷温度に近いことが想定されるから、利用に先立って、海氷解析値と SST 観測値との間に経験的な換算式を算出しておく。ここでは、Rayner et al. (2003) に従い、SST を海氷密度度の 2 次式でフィッティングする。新たな試みとして、COBE-SST2 では海面塩分濃度の違いにより結氷温度が季節・海域によって異なる効果も、経験式算出の際の拘束条件として考慮されている。SST 解析時には、海氷密度度から換算された SST を現場観測のように取り扱うが、相応に観測誤差は大きく設定する。

観測データの品質管理手法は、Ishii et al. (2003) および ISSM05 に則る。測器のタイプによる測定精度の違いは、Reynolds and Smith(1994) に準じて考慮する。また、ISSM05 と同じ手法で作成したブラックリスト（バイアスをもつコールサインのリスト）も解析に利用する。

3. 観測手法の変遷に伴うバイアスの補正

SST の長期変動シグナルを適切に表現するには、観測手法の変遷の影響を取り除く必要がある。

図 1 に示されるように、SST 観測手法の主流は時代とともに大きく変わり、近年はその大部分が漂流ブイによるものとなっている。漂流ブイは、船舶とは異なり、観測対象の海水を移動させることなく直接測るので、バイアスの混入する余地が小さい。本研究で取り扱う現場観測データの中では最も信頼性の高い観測データであると考えられるため、これをバイアス補正の基準とする。定置ブイもまた、漂流ブイとの比較結果を踏まえ

て、同じ性質の観測として取り扱う。

ブイを基準とした場合、補正の対象となる観測種別は、バケツ、ERI および unknown（種別不明）の三者となる。unknown の内訳が問題となるが、通常、ブイはメタデータが完備されていることから、バケツか ERI のみで構成されていると仮定する。こうして、三者のバイアス補正量(°C)は、以下のように定義される。

$$\alpha\{(1-\beta)\delta_{iB} + \beta\delta_{uB}\} + (1-\alpha)\delta_{ERI} \quad (1)$$

ここで、 α は unknown 全体に占めるバケツ観測の割合、 β はバケツ全体に占める非断熱バケツの割合、 δ_{iB} 、 δ_{uB} 、 δ_{ERI} はそれぞれ、断熱バケツ、非断熱バケツ、ERI のバイアスである。 α および β は年代によって変化する。

本研究では、月平均 5x5 ボックス平均値同士の比較により、ERI のブイに対するバイアスの推定値として、全球平均で +0.13°C を得ている。そこで、ブイおよび ERI のバイアスはそれぞれ、 $\delta_{iB} = 0$ 、 $\delta_{ERI} = +0.13$ と設定する。 δ_{uB} には、Folland and Parker (1995) の補正值を利用する。ここでは、メタデータにより ERI と判断できる観測には、 $\alpha = 0$ として、 δ_{ERI} だけを補正する。一方、メタデータによりバケツであると分かれば、 $\alpha = 1$ として、年代に応じて変化する非断熱バケツの割合 β を考慮して補正する。Unknown であれば、次に述べる手順で推定した α と β をもとに、一律に補正を行う。

はじめに、観測手法が分かっている (known) データを元に、非断熱バケツの割合 β の年代変化を見積もる。既知のバケツ観測のみで求めた 5x5 ボックス平均全球時系列が、その他のブイや補正済み ERI 観測の混合観測で求めた全球平均時系列と一致することを仮定すると、 β が一意に求まる。この β を unknown 中の非断熱バケツの割合にも適用する。また、第二次大戦以前(1942

年以前)については、unknown のバケツはすべて非断熱であることを仮定する。ここで得た非断熱バケツの割合 β の時系列は、独立な手法で求められた Kennedy et al. (2011) の結果とよく一致することを確認している。続いて、 α を known と unknown の時系列の比較により一意に求める。Unknown の時系列の構築には、上で得た β を再利用する。

いま求められた観測種別の割合 α や β は、格子点・月をそろえた全球平均の比較により導出されているので、絶対的なものである。一方、観測種別ごとの寄与は、時間方向だけでなく、空間方向にも不均一である。近年の漂流ブイの急増により、とりわけ南半球の高緯度帯のような、以前は船舶の往来が少なかった海域でも観測がなされるようになってきた。この場合、別のタイプのバイアスを考慮に入れる必要がある。個々の観測のバイアスのサイズがいかにか正確に分かったとしても、格子平均 SST には、これに観測種別ごとの格子内の存在比率をかけたものが実効的な補正量となる。このため、ERI を基準にすると、これと比べて低温である漂流ブイの急増は偽の寒冷化トレンドを生じる。同じ理由から、ERI より低温であるバケツ観測の減少は偽の昇温トレンドにつながる。この点で、本来は真値に対する絶対的な量で定義されるべきバイアスは、相対的なものにならないを得ない。ここでは、全球平均への寄与が比較的安定している ERI に基準を置き、断熱バケツとブイに対しては、 $+0.09^{\circ}\text{C}$ および -0.05°C のバイアスを設定し、ERI との寄与率の差を乗じた量を補正する。こうした、観測分布の急激な遷移に伴う、人為的なトレンドは、表層水温解析における XBT 観測の例でも指摘されている (Ishii and Kimoto, 2009)。

図 2a には、全球平均 SST に対する観測種別ごとの寄与の時系列を示す。1940 年以前はバケツ、第二次世界大戦期間では ERI、ふたたび 1940 年代からしばらくは、バケツ

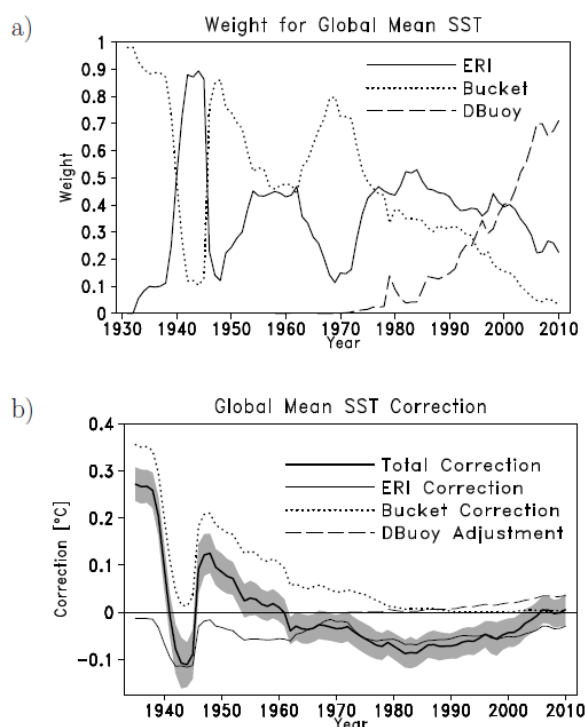


図 2：全球平均 SST への各観測種別の重み(上)、各観測種別に対する全球平均バイアス補正量 (下) 実線、点線、ダッシュ線はそれぞれ、ERI、バケツ、ブイを表す。ここに示されていない、他の観測種別の寄与は小さい。バイアス補正図(下)では、全観測による、全球平均バイアス補正量を太実線、その 95%信頼区間を陰影で示す。統計は 5x5 のボックス平均値に基づく。

の寄与が大きい。1970 年代以降は ERI の比率が次第に増す。図 2b には、全球平均したバイアス補正両を示す。図 2a で見られた観測種別ごとの寄与の変遷を反映して、全球平均バイアス補正量も変化している。

4. 客観解析手法

本データセットは、1845 年から 2010 年までの 150 年以上の期間を解析対象とする。その間、観測分布は絶えず変化しており、新航路の開拓や戦争による船舶の往来の減少、ブイなどのロボット型観測の開始、などは観測分布を時空間方向に極めて不均一なもの

としている。こうした観測分布の歪みが、解析値の品質へ与える影響を極力小さくするような手法が必要となる。

本研究では、“multi-time-scale analysis”(以降、MTA)と呼ぶ手法をあらたに提案する。MTAでは、SSTの日平均場が長期トレンド、年々変動および日々変動の3成分の和で構成する。誤差は、それぞれの解析誤差の2乗和で表現する。

長期トレンド成分は、5x5 ボックス平均した年平均 SST 偏差の第一主成分(EOF1)で定義する。観測データにはあらかじめ第3節で記述したバイアス補正を施す。格子点値が、解析対象期間(1845-2009年)の半分以上欠けている場合、その格子は使用しない。

年々変動成分は、月平均 SST 偏差の 90% を説明する EOF モード群として定義する(Kaplan et al. 1998; Smith and Reynolds 2004; Rayner et al. 2006)。EOF はバイアス補正を施した現場観測と衛星観測を使用し、1961-2005 年の統計により求める。解析の際には、解析対象日を中心とする 31 日移動平均に対して求めた EOF の係数をフィッティングする。最適な時係数 \mathbf{x} は、次の評価関数を最小化するように選ばれる。

$$J = \mathbf{x}(\mathbf{P}^f)^{-1} \mathbf{x} + (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^t \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})$$

ここで、 \mathbf{P}^f は背景誤差共分散行列、 \mathbf{R} は観測誤差共分散行列、 \mathbf{H} は格子点の位置から観測の位置までの線形内挿演算子、 \mathbf{y} は観測された偏差ベクトル、をあらわす。観測 \mathbf{y} は、近隣の観測をマージしたものを使用し、誤差 \mathbf{R} は、測器のタイプに応じて設定された誤差が、複数観測のマージに伴って低減する効果を含む。ここで、 \mathbf{P}^f は EOF で表せることを利用すると、解析誤差は次の形で書き直すことが出来る。

$$\mathbf{P}^a = \mathbf{F}(\mathbf{A}^{-1} + \mathbf{F}^t \mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^t$$

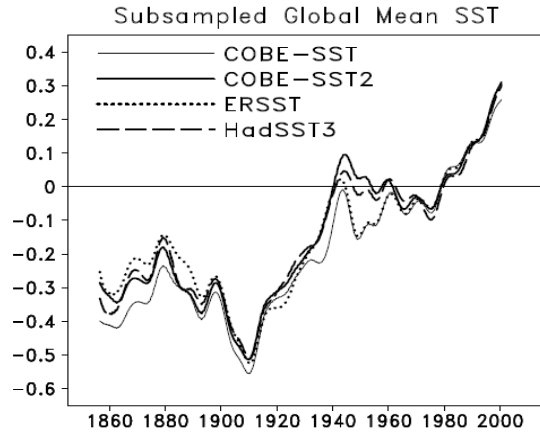


図3：全球平均 SST

COBE-SST(細実線)、COBE-SST2(太実線)、ERSST(点線)および HadSST3(ダッシュ)の全球平均 SST を示す。1961-1990 年からの偏差に対して、IPCC 第4次評価報告書の Appendix 3.A. に掲載されている時系列フィルタを施している。

ここで、 \mathbf{F} は EOF の固有ベクトル、 \mathbf{A} は固有値行列を表す。

日々変動成分は前日 SST からの差で定義し、これを OI (最適内挿法) で解析する。背景誤差分散は、別途、衛星と現場観測を用いて 31 日移動平均からの偏差の分散として求める。求められた日々変動の分散は、年々変動のおよそ 30% から 100% ほどであり、混合層の薄い夏季に分散が大きい傾向がある。EOF 再構成解析は日別の実施されるが、打ち切られた高次のモードの分散は、現場観測のある海域に限って、この日々変化の解析で補うことが出来る。OI の解析手続きや誤差の算出等は、ISSM05 に則って行なう。

5. 解析結果

ここでは、COBE-SST2 の性質を、他のデータセットとの比較を通じて把握する。SST 解析データセットはいくつかあるが、そのうち、HadSST3(Kennedy et al. 2011)、ERSST(Smith and Reynolds 2004)、NCEP OI v2(Reynolds et al. 2002)を対象とする。

図3は、全球平均 SST を示す。比較の際には、HadSST3 が観測の得られないグリッ

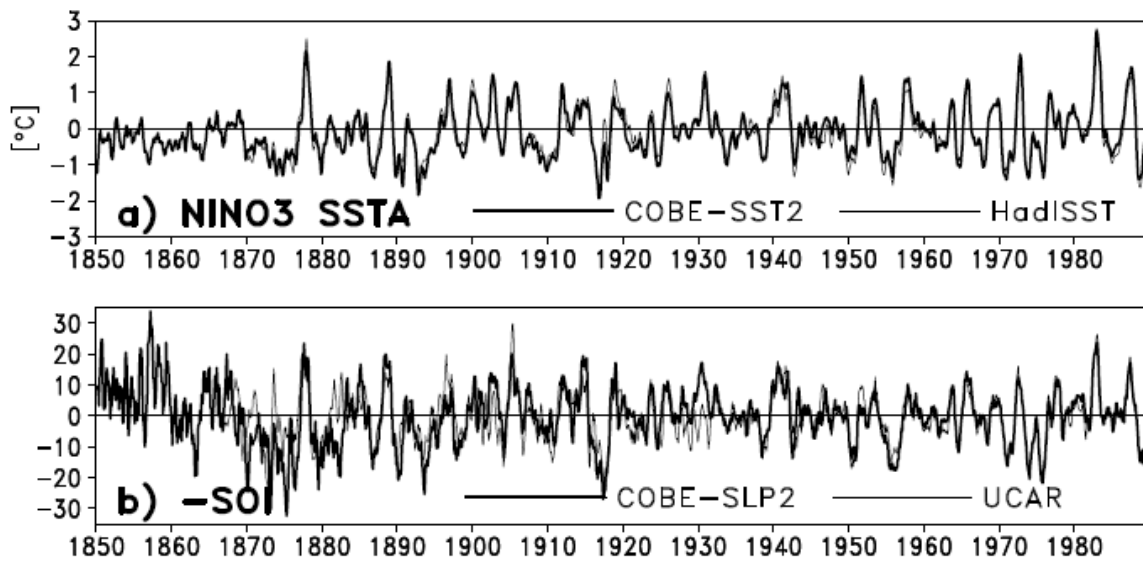


図4：5か月移動平均した NINO.3 SST 偏差(上)と SOI(下)

実線は COBE-SST2、細線は、上図では HadISST、下図では UCAR SOI をあらわす。比較のため SOI の符号は反転させている。1990 年以降の近年は、それ以前と同様に高い相関関係が続くので、省略。

ドを欠測としているので、これにあわせて共通の格子点だけ用いて全球平均する。

時系列はよく一致し、デーセット間のバラつきは 1860 年以降はおおむね 0.1°C 以内におさまる。150 年間の線形トレンドは、共通して約 $+0.6^{\circ}\text{C}$ である。全球平均トレンドには、観測データへのバイアス補正手法の違いがよく現れるが、大きく異なる手法に拠った HadSST3 と COBE-SST2 とはよく特徴が一致している。旧バージョン COBE-SST との差が大きいのは、1940 年ごろから 1980 年ごろにかけて、緩やかな降温トレンドとなる時期である。ここでは、逆に COBE-SST では一度大きく降温したのちに、昇温トレンドとなっている。この時期は、近年明らかとなった低温バイアスをもったバケツ観測が 1941 年以降も多く存在していた期間に相当するので(図 2b)、これを補正できているかどうかは差の原因と考えられる。2000 年代に入ってから COBE-SST の昇温トレンドが他とくらべて緩やかであることの原因は、主流の観測手法がバケツから漂流ブイへ移行することによる偽の低温化傾向を補正し

ているかどうかによる。

図 4 は、NINO.3(150-90W, 5S-5N)で平均した SST 偏差と南方振動指数(SOI)の時系列を示す。UCAR(University of Cooperation for Atmospheric Research)より取得した SOI は、ダーウィンとタヒチの間の地上気圧の差で定義されている。どちらも、沿岸部の都市である。COBE-SLP は、これら観測地点にもっとも近い海洋格子点の SLP の差で定義した。UCAR SOI と COBE-SLP を比較すると、1880 年代前半、1930 年ごろに若干の差は認められるが、おおむね、1870 年以降についての変動は良く一致している。SOI と NINO.3SST を比較すると、1880 年代以降の時系列の上昇・下降のタイミングがよく対応している。SST とは独立な陸上・海上気圧データと、物理的に対応関係を背景に、高い相関関係が過去に遡って得られるということは、間接的に NINO.3 SST の信頼性の高さを示唆する。1870 年代以前で SST の変動が小さくなるのは、定点観測である UCAR SOI と対し、海洋観測は数が少なくなるためだと考えられ

る。

6. 誤差評価

本節では、歴史的 SST 解析の誤差を評価する。着目するのは、過去得られた観測分布

去の分布を再現したデータをもって解析を行い（疑似解析）、衛星観測も使用した OI 解析値と比較する。差が小さいほど、その時代の領域平均 SST の信頼性は高いと判断できる。

COBE-SST2 では、歴史的客観解析に適した MTA を採用した。これが従来の OI と比べてどのような利点があるのかにも着目したい。このため、観測データの品質管理やバイアス補正手法は同一のものに揃えた OI の結果もあわせて評価する。疑似解析に使用される現場観測データは、品質管理を通過し、ごく近隣地点の観測のマージ処理を終えた後のデータであり、両解析スキームで共通して使用される。観測位置のマッチアップは、月と日の情報のみを用いて、前後 15 日の重複収集は許容する。評価は、MTA における EOF の定義期間と重複すること为避免、2006 年から 2010 年とする。

図 5 は、全球と NINO.3 で平均した SST について、根二乗平均差 (RMSD) の時系列を示す。MTA (黒太実線)、OI (黒太破線) とともに 1840 年代と 1860 年代に特に誤差が大きい。1910 年代、1940 年代にもそうした時期が見られるが、おおむね、1880 年代以降は、年々変動 (自然変動) の 1σ より十分に高い精度があると期待される。全球については 1920 年ごろから、NINO.3 については 1960 年ごろから、RMSD がデータセット間 (COBE-SST2, HadISST, ERSST) の平均的な差 (一点鎖線) よりも小さくなる。データセットが異なると、解析スキームだけでなく、バイアス補正手法や品質管理手法にも違いがあるが、この疑似解析ではこうした差が無いためだと考えられる。

OI との比較からは、MTA の長所が 2 点確認される。ひとつは、観測分布の変化に対する安定性である。1960 年代以降、海洋の 8 割が観測される (図略) になると大きな差は無いものの、それ以前については、年代を通じて MTA のサンプリング誤差は OI

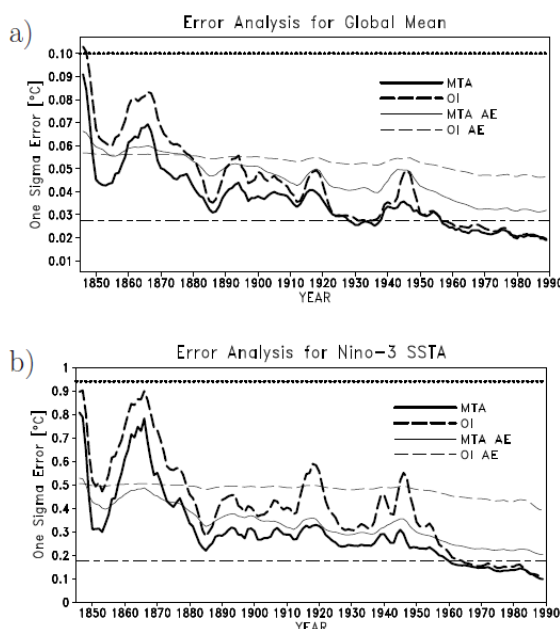


図 5 : 全球平均 SST(上)および NINO.3 SST(下)の解析誤差

太線は疑似観測を用いた疑似解析の誤差、細線は実際の解析誤差。実線および点線は、それぞれ、解析スキームに MTA および OI を用いたもの。疑似解析の誤差は、参照解析値との RMSD で計算する。参照解析値は現場観測と衛星観測を利用して、OI で解析されたもの。ドットは、1961-2005 年の全球および NINO.3 の年々変動の標準偏差をもつて、その時代に解析された領域平均 (1 σ)。一点鎖線は、同じ期間の、COBE-SST2、HadISST および ERSST の 3 つのデータセット間の RMSD の平均。見やすくするため、時系列は、元の月平均誤差を年平均し、さらに 5 年移動平均を施している。過去の観測分布に合わせて観測を選択的に間引く。同じ年代の同じ観測から、擬似的に過

より小さい。もうひとつに、MTA（黒細実線）で算出される解析で算出される解析誤差が、この擬似解析で得たサンプリングエラーの年代変遷の特徴をよく捕らえていることが挙げられる。

7. まとめ

歴史的海面水温客観解析 COBE-SST (Ishii et al. 2005) の改善を図った。ICOADS2.5 への対応、海氷解析の均質化(本報告では省略)、海氷密接度-SST の統計的関係式の見直し、バイアス補正手法の変更、などに加えて、解析手法を改良した。新しい解析スキームでは、変動の成分を長期トレンド、EOF による年々変動、日々変動の和として定義し、日々に SST の解析場と解析誤差を提供する。年代による観測データの粗密の変化が解析場に与えるサンプリング誤差を統計的な観点から検討したところ、従来の OI に比べて、こうした影響を受けにくいことが分かった。また、MTA は OI とは異なり、南半球高緯度など、過去に遡って観測の得られにくい海域においても変動を解析することが出来る。さらに解析値の信頼性は格子点ごとに解析誤差の形で算出されるので、この解析誤差を力学モデルの摂動の作成などに利用することも可能かもしれない。

第3節では、全球平均 SST 時系列の一貫性を重視したバイアス補正を試みた。Kennedy et al.(2010)とは大きく異なるアプローチによりバイアス補正を試みたにも係らず、全球平均 SST の時系列には Kennedy らの結果と良い一致が見られた。

最後に、過去の観測分布を擬似的に再現し、解析値の信頼性の評価を行った。評価の結果、全球平均、および NINO.3 で平均した SST は、少なくとも 1880 年代以降については十分な精度で解析できていることが分かった。NINO.3 については、別途、SOI との対応関係という物理的な観点から検討を行い、同じく 1880 年代以降については信

頼できるという結論を得た。

今後は、引き続き、歴史的な海上気象観測の客観解析値の不確実性の低減に取り組んでいきたい。本研究で導入したバイアス補正手法には改善の余地があり、今後あらたなメタデータの発掘等にあわせて、手法をアップデートする必要がある。気候研究や力学モデルのさらなる発展に資するためにも、不確実性の評価にもいっそう取り組んでいきたい。

8. 謝辞

ICOADS は CDC/NOAA より、AVHRR データは PO.DAAC/NASA より、海氷密接度の計算に利用した SMMR, SSM/I, SSMIS のデータは NSIDC/コロラド大学より、SOI 指数は UCAR より、衛星観測以前の北半球の海氷密接度データセットはイリノイ大学より提供されている。NOCS/UK の Kent 博士には、WMO Pub.47 の情報提供を受けた。JAMSTEC の小室氏には、近年の海氷変動に関する有益なコメントをいただいた。本研究では、文部科学省の気候変動リスク情報創生プログラムにより支援を受けた。ここに記して感謝申し上げたい。

9. 参考文献

- Folland, C. K. and D. E. Parker, 1995:
Correction of instrumental biases in historical sea surface temperature data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 319–367.
- Ishii, M., M. Kimoto, and M. Kachi, 2003:
Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 51–73.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.

- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437 – 470.
- Kaplan, A., M. A. Cane, Y. Kushnir, and A. C. Clement, 1998: Analyses of global sea surface temperature 1856–1991. *J. Geophys. Res.*, **103**, 18,567–18,589.
- Kennedy, J. J., N. A. Rayner, R. O. Smith, D. E. Parker, , and M. Saunby, 2011: Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured in situ since 1850, part 2: biases and homogenisation. *J. Geophys. Res.*, **116**, D14104, doi:10.1029/2010JD015220.
- Manabe, T., 1999: The digitized Kobe Collection, Phase I: Historical surface marine/marine meteorological observations in the archive of the Japan Meteorological Agency. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 2703–2715.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369 – 432.
- Rayner, N. A., D. E. P. P. Brohan, C. K. Folland, J. J. Kennedy, M. Vanicek, T. J. Ansell, and S. F. B. Tett, 2006: Improved Analyses of Changes and Uncertainties in Sea Surface Temperature Measured In Situ since the Mid-Nineteenth Century: The HadSST2 Dataset. *J. Climate*, **19**, 446–469.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**, NO. D14, 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes, and W. Wang, 2002: An improved in-situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609–1625.
- Reynolds, R. W. and T. M. Smith, 1994: Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, **7**, 929–948.
- Smith, T. M. and R. W. Reynolds, 2002: Bias Corrections for Historical Sea Surface Temperatures Based on Marine Air Temperatures. *J. Climate*, **15**, 73–87.
- Smith, T. M. and R. W. Reynolds, 2004: Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *J. Climate*, **16**, 1495–1510.
- Tomosada, A., 1982: *Stationary observation data at lighthouses and stations committed by fisheries Research Institutes (Toudai Oyobi Suisan-Sikenjou Itaku no Teichi Kansoku Shiryō)*. Research Collections of Tokai Regional Fisheries Research Laboratory, No.10, (Toukai-ku Suisan Kenkyu Siryoushu Dai 10 Gou). 369pp. (in Japanese).
- Uppala, S. M., P. W. K. Allberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. D. C. Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. V. D. Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Ho’lm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P.

- Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, and J. Woollen, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 2961 – 3012.
- Woodruff, S. D., S. J. Worley, S. J. Lubker, Z. Ji, J. E. Freeman, D. I. Berry, P. Brohan, E. C. Kent, R. W. Reynolds, S. R. Smith, and C. Wilkinson, 2011: ICOADS Release 2.5: Extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. *Int. J. Climatol.*, **31**, 951–967, doi:10.1002/joc.2103.